

ROBOT TREPADOR DE PALMERAS Y SISTEMA ASOCIADO PARA LA DETECCIÓN DE COCOS (*Cocos nucifera* L.)

COCONUT PALM CLIMBING ROBOT AND ASSOCIATED SYSTEM FOR COCONUT FRUIT DETECTION (*Cocos nucifera* L.)

René Ramírez-Ramírez¹; Federico F. Hahn-Schlam²

¹ Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México-
Texcoco, km 38.5, Chapingo, Estado de México, C.P. 56230, MÉXICO. Correo-e: rramirezr0401@yahoo.com.mx

²Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-
Texcoco, km 38.5, Chapingo, Estado de México, C.P. 56230, MÉXICO.

RESUMEN

La escasez de jóvenes en el campo que se suban a las palmeras, obliga al uso de un robot que coseche los frutos de coco. Para la construcción del autómata que aquí se expone se diseñó una estructura que se adapta fácilmente al tallo de la palmera (inclinación, altura y grosor). Esta estructura utiliza un mecanismo biela-manivela para lograr que ascienda por la palmera soportando su propio peso, que es aproximadamente de 7 kg, y comprende la estructura, motores, baterías, cámara y todos los dispositivos electrónicos necesarios para su funcionamiento. El sistema de visión artificial se compone de una cámara IP que se encarga de captar las imágenes del punto en que se encuentra el robot, y posteriormente, mediante un procesamiento basado en un algoritmo de detección de elipses, se identifica la presencia de cocos en la palmera.

PALABRAS CLAVE: Robot trepador, visión artificial, software.

ABSTRACT

Lack of young farmers capable of climbing palms requires of a robot for harvesting coconut fruits. For the construction of the robot, a structure was design that could adapt easily to the trunk of the tree (inclination, height and diameter). The structure has a crank-connecting rod system that is capable of climbing the palm tree and carries at the same time a motor, a battery and a camera which all together weighs 7 kilograms. The system of artificial vision includes a camera IP that takes images to recognize the robot position. An algorithm that detects ellipses identifies the presence of coconut fruits.

KEYWORDS: Climbing robot, artificial vision, software.



Recibido: 10 de abril, 2013

Aceptado: 24 de mayo, 2013

doi: 10.5154/r.inagbi.2013.04.001

INTRODUCCIÓN

El cocotero es una planta de la que se obtiene una gran cantidad de productos, uno de los cuales es el aceite que se extrae a partir de la copra, en lo cual radica su importancia para México. Asimismo, los nutrientes existentes en el agua de coco hacen de ella una bebida hidratante para los deportistas. La bebida de coco es biológicamente pura, deliciosa y llena de sales, azúcares y vitaminas (Hahn, 2012).

A pesar de la gran importancia que tienen los productos obtenidos de la planta de coco, en México no se considera rentable debido a que los precios de producción son superiores a los ingresos obtenidos por las ventas de sus productos. Esta baja productividad se relaciona con las técnicas de manejo utilizadas, que en su mayoría son rudimentarias; y por otro lado la actividad de producción del coco se abandona por completo, ya que la cosecha es la única actividad que se realiza (Granados y López, 2002).

La construcción de robots que suban y bajen de la palma del cocotero empezó con la búsqueda de sustituir el trabajo realizado por los bajadores de frutos, que requiere de habilidad y lo realizan hombres muy jóvenes que están expuestos en un 10 % a una lesión (Megalingam *et al.*, 2013). Si la copra es el producto final, no importa que los racimos de coco caigan y se partan por el golpe; pero cuando el agua es el objetivo, se requiere que el fruto no se golpee ocasionando una ruptura. Este gran interés se ha visto reflejado en el diseño y construcción de diferentes prototipos (Megalingam *et al.*, 2013; Tavakoli, 2010).

En la actualidad los robots también se utilizan para determinar la presencia de plagas (Siriwardena *et al.*, 2010; Pinhas *et al.*, 2008). El método más popular para adquirir datos es mediante un operador humano. La periodicidad entre dos mediciones continuas es de un mes, y presenta como desventajas que es oneroso, requiere mucha mano de obra y las trampas no pueden sincronizarse para medir

la población de la plaga (Jian *et al.*, 2008). Esto produce una medición pobre de la dinámica de la densidad de la plaga. La larva del *Rynchophorus ferrugineus* se alimenta de los tejidos suaves dentro del tallo de la palmera, y puede detectarse mediante un micrófono sensible (Mankin *et al.*, 2011). Asimismo, las colmenas de abejas en los tallos de cocoteros se detectan y erradican mediante el robot.

El propósito de este trabajo fue diseñar, construir y probar un sistema robótico capaz de trepar palmeras para la detección de cocos mediante un sistema de visión artificial. El prototipo tiene la capacidad de que se le incorporen sensores para determinar plagas, así como cosechar automáticamente los cocos, con lo cual reduce los costos generados e incrementa la seguridad durante la cosecha.

MATERIALES Y MÉTODOS

El diseño completo del robot se dividió en tres partes (Figura 1). La primera parte es el software de control, que se encuentra escrito en lenguaje C# de la plataforma visual.Net y es el encargado de manipular todos los componentes del robot (cámara y actuadores) en forma remota. La segunda parte del sistema la integran los elementos encargados de comunicar al ordenador con el robot en forma inalámbrica, para lo cual utiliza los protocolos de comunicación TCP/IP y USB/USART/RF (radiofrecuencia). Finalmente, el sistema mecánico constituye la parte física del robot, integrado por su estructura, los actuadores, una cámara IP, un brazo robótico de cuatro grados de libertad y un sistema electrónico que se encarga del funcionamiento de los elementos mencionados.

El diseño de la estructura del robot se basó en la forma en que los cortadores de cocos trepan las palmeras (Figura 2a), con una cuerda que se coloca alrededor del tronco y se cuelgan sobre éste, con los pies apoyados en la parte baja. El propio peso de la persona impide que la cuerda se deslice hacia abajo, permitiendo su ascenso por la palmera (Fi-

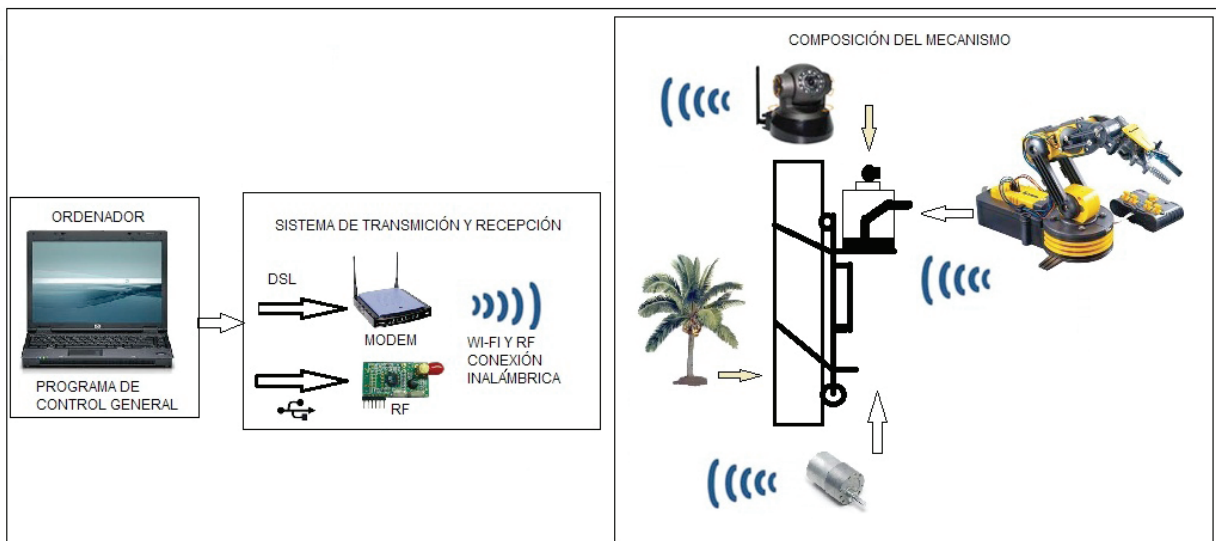


FIGURA 1. Elementos que integran el sistema robótico.

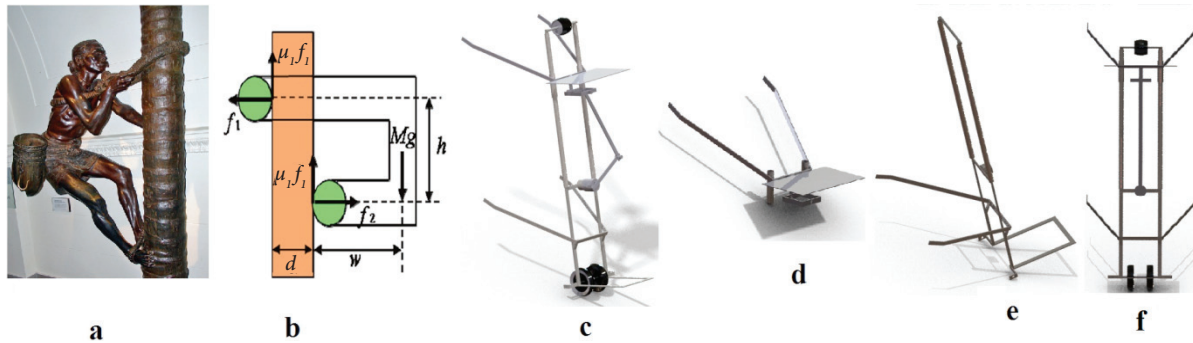


FIGURA 2. Sistema mecánico del robot.

gura 2b). La estructura total del robot se elaboró usando solera de acero de 1.27 cm de ancho por 3 m de largo, y se dobló dándole la forma mostrada en la Figura 2c; la estructura consta de dos partes: una superior (Figura 2d) que simula los brazos de una persona, y otra inferior (Figura 2e) que simula sus piernas. Se le instaló un mecanismo de biela-manivela (Figura 2c) para que el robot ascienda por la palmera; la manivela se encuentra acoplada a un motor (mod. 88960088, AC Delco, USA) y éste a su vez se encuentra fijo en la parte inferior de la estructura, mientras que la biela está acoplada con la parte superior.

Para la descripción del funcionamiento del mecanismo supóngase que la posición inicial (0°) de la biela-manivela es la mostrada en la Figura 2f y que la manivela gira en sentido anti-horario; entonces al girar de 0° a 180° la fuerza proporcionada por el motor tiende a bajar de la parte superior de la estructura. Esto ocasiona que todo el peso del sistema se cargue sobre esa parte, evitando que se deslice para que funcione como punto fijo. La parte inferior de la estructura resulta ser la parte móvil. Al girar la manivela de 180° a 360° el peso del sistema se carga sobre la parte inferior, con lo cual se logra que esta parte funcione como punto fijo y en consecuencia la parte superior será la que se deslice hacia arriba. Este proceso se repite hasta que el robot llega al punto deseado sobre la palmera.

Para desarrollar el modelo matemático que describe el comportamiento estático del robot en dos dimensiones (Figura 2b), hay que tomar en cuenta las siguientes consideraciones, en el momento en que la parte superior está fija y la inferior móvil, después de un momento dichos elementos se encuentran en condiciones contrarias, por lo cual el modelo funciona de la misma manera para ambos casos. Además cabe mencionar que los puntos de contacto entre la palmera y el robot corresponden a un grupo de llantas integradas al mismo y a la cuerda que se encuentra alrededor de la palmera sujetando los brazos del robot. En primer lugar se toma en cuenta la posición de equilibrio, la cual está descrita por las ecuaciones:

$$\mu_1 F_1 + \mu_2 F_2 = Mg \quad (1)$$

$$F1 = F2 \quad (2)$$

El equilibrio del momento en el punto de contacto de la parte baja está dado por:

$$F_1 h - \mu_1 F_1 d = Mg w \quad (3)$$

Donde:

M : masa del robot (kg);

μ_1 y μ_2 : coeficientes de fricción;

F_1 y F_2 : fuerza que ejerce la palmera sobre la cuerda y las ruedas, respectivamente (N);

d : diámetro de la palmera (m);

h : altura entre los puntos de contacto entre la palmera y la sección de análisis (m);

g : aceleración de la gravedad ($m \cdot s^{-2}$), y

w : distancia entre el punto de contacto entre la palmera y la sección de análisis (m).

Considerando que el material que envuelve la cuerda que soporta al robot es el mismo que el de las llantas, y por tanto, los coeficientes de fricción de ambos elementos con respecto al tallo de la palmera son los mismos, se obtiene:

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu \quad (4)$$

Sustituyendo (2) y (4) en (1)

$$M = \frac{Mg}{2F} \quad (5)$$

Sustituyendo (2) y (4) en (3) y despejando F :

$$F = \frac{Mg w}{h - md} \quad (6)$$

Sustituyendo (6) en (5)

$$\mu = \frac{h}{d + 2w} \quad (7)$$

Sustituyendo (7) en (3) se obtiene el valor de la fuerza ejercida por la palmera sobre los puntos de contacto del robot cuando éste no está en movimiento.

$$F1 = F2 = \frac{d + 2w}{2h} Mg \quad (8)$$

El robot, cuyo sistema de visión consiste en una cámara IP marca PANASONIC que transmite en forma inalámbrica hacia un ordenador el video de la trayectoria que sigue a lo largo de la palmera, se detiene cuando se encuentra a una distancia de aproximadamente 30 cm por debajo del punto donde comienzan las hojas de la palmera. En este trabajo se le integró de una herramienta que permite la detección automática de cocos con un algoritmo de visión artificial, que se concreta al llegar al punto deseado con una toma de fotografías usando varios ángulos. Así, mediante un procesamiento matemático será posible que automáticamente se detecten los cocos y se realice el corte sin la intervención humana.

El algoritmo utilizado para la detección de cocos se muestra en la Figura 3. Los pasos seguidos para este proceso consisten en obtener los bordes de la imagen usando el filtro de Sobel y posteriormente aplicar la segunda derivada, adquiriendo también el mapa de direcciones de los bordes obtenidos durante este proceso para que posteriormente se aplique el método desarrollado y así obtener la presencia de cocos en la imagen analizada.

El método propuesto consiste en que una vez obtenido un mapa binario de los bordes de la imagen se le aplica una máscara con la intención de eliminar todos los elementos que no sean cocos (hojas de la palmera). Esta tarea se logra realizando un escaneo por toda la imagen; al detectar un borde se analiza que éste no exceda cierto número de píxeles. Si el número de píxeles alrededor del punto de análisis excede el número deseado, se elimina este píxel y se analiza el siguiente.

La máscara usada para este proceso se puede representar por la siguiente matriz:

n-m	...	n-2	n-1	Pa	n+1	n+2	...	n+m
1		1	1	(0)	1	1		1

(9)

Donde:

Pa – Pixel de análisis

n – número de píxel alrededor del píxel de análisis

m – tamaño de la máscara

Esta máscara consiste en posicionar el Pa en el píxel que se va a analizar y posteriormente se multiplica cada uno de los elementos de la matriz por los píxeles n-1, n-2, etc., y n+1, n+2, etc., hasta completar el número de elementos de la matriz usada; una vez realizado el proceso usando la matriz horizontal se obtiene la matriz traspuesta de (7) y se realiza la misma operación. Cabe mencionar que la dimensión de la matriz usada dependerá del tamaño de la imagen y del tamaño del coco dentro de la imagen; esta variable se indica por el usuario.

En primer lugar, este proceso se realiza a partir de Pa hasta n – m y se guarda el número de píxeles encontrados que forman parte de un borde. Posteriormente se realiza desde Pa hasta n + m utilizando el mismo procedimiento y se comparan los valores obtenidos; si alguno de los dos es 0, entonces el Pa se considera como parte del borde del coco; en caso contrario, se elimina el Pa colocando el valor cero en esa posición. Una vez hecho lo anterior, se aumenta el tamaño de m y se aplica el mismo procedimiento con la finalidad de eliminar los puntos que no corresponden al borde de un coco y que no fueron eliminados en el paso precedente.

Para la obtención de los cocos en la imagen digital se aplica el método de detección de elipses propuesto por Xie y Yi (2002). Se supone que el contorno del coco forma un elipse, por lo que al aplicar la ecuación de la elipse sobre los bordes y al obtenerse una correspondencia superior al 50 % se supondrá que un coco está presente dentro del área analizada.

En cuanto al sistema para el control del robot, se desarrolló un módulo electrónico basado en un microcontrolador PIC18F4550 para el caso de la transmisión del ordenador hacia el robot integrándole un módulo de radiofrecuencia de 915 MHz. Del lado del robot se programó un AVR ATmega32, al que también se le integró un módulo de radiofrecuencia de 915 MHz. Todo este control se realizó a partir de un software desarrollado en lenguaje C# de la plataforma visual.NET, además de que este software es el encargado de captar las imágenes desde la cámara IP, y posteriormente aplicarles el procesamiento para la detección de los cocos.

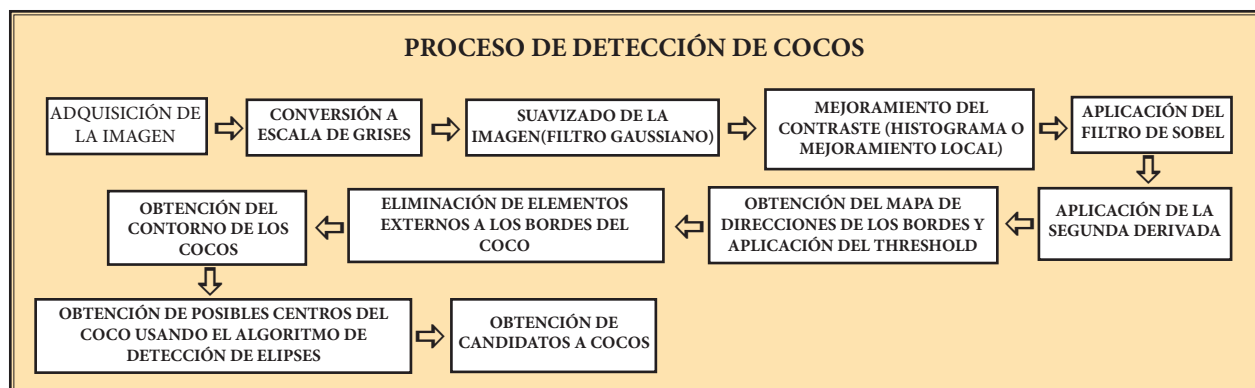


FIGURA 3. Pasos para la detección de posibles cocos.



FIGURA 4. Estructura física del robot construido.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 4 muestra al robot en operación enseñando el mecanismo para su ascenso sobre la palmera. Los brazos en forma de “trapecio” inclinado con respecto a la horizontal ayudan a que el aparato se detenga sobre el tronco, lo que evita que se caiga por algún desequilibrio. En la tercera y cuarta imagen se observa al robot con todos sus componentes integrados.

Para las pruebas de ascenso del robot se utilizaron palmeras cuyo diámetro mayor era de 35 cm en promedio a una altura de 1.2 metros. En la parte superior a 1.5 metros el diámetro promedio era de 27 cm. Inicialmente se realizó el ascenso usando sólo la estructura y activando el motor desde el suelo. El robot subió los primeros 80 cm en un tiempo promedio de 30 segundos. En la distancia restante hubo secciones de la palmera en las que resbalaba debido al cambio de diámetros entre el punto en el que se inició el ascenso y el punto en el que se encontraba demorando 1.5 minutos en subir otros dos metros. Por otro lado, debido a la variedad de condiciones de la palmera se daba el caso en que los diámetros de ésta aumentaban y posteriormente disminuían, lo que ocasionaba que el motor requiriera un mayor torque para vencer estos cambios. Este problema se resolvió utilizando un moto-reductor de 45 RPM en las llantas de la sección inferior, lo que ayudaría a generar un mayor torque durante el desplazamiento de la sección inferior.

Se observó que en palmeras inclinadas, el robot automáticamente “resbalaba” hacia el punto de inclinación por efecto de la fuerza de gravedad, de modo que en ocasiones el robot subía por un punto diferente al deseado, pero siempre tomaría ese camino.

Al subir al robot con todos sus componentes instalados (cámara, mecanismo para mover cámara, electrónica, brazo robótico y batería), aumentó el peso en 4.3 kg. La

velocidad del motor se vio afectada, y en consecuencia el tiempo de ascenso aumentó; como se indicó, sube 80 cm en 30 segundos sin carga y en un minuto con carga.

Es importante mencionar que el tiempo que se emplea para instalar el robot en la palmera para que inicie el ascenso es de dos minutos en promedio, y el tiempo que lleva quitarlo de la palmera y colocarlo en otra es de cuatro minutos, por lo que se observa que el sistema diseñado resulta ser muy práctico en cuanto a instalación y desinstalación.

Respecto del control de los componentes vía remota desde el computador (Figura 5), se realizó exitosamente, además de que la captación de imágenes fue satisfactoria. Para verificar el alcance de transmisión de datos se controló el sistema a una distancia de 2, 5, 15 y 30 m de la palmera, obteniendo la misma calidad de transmisión.

Considerando el modelo de visión artificial, se puede hacer referencia a las Figuras 6 y 7, las cuales siguen el orden de tratamiento que se muestra en el diagrama de la Figura 3. En esas figuras se observa el comportamiento de la imagen original a medida que se le va aplicando cada uno de los algoritmos descritos anteriormente.



FIGURA 5. Módulo de control.

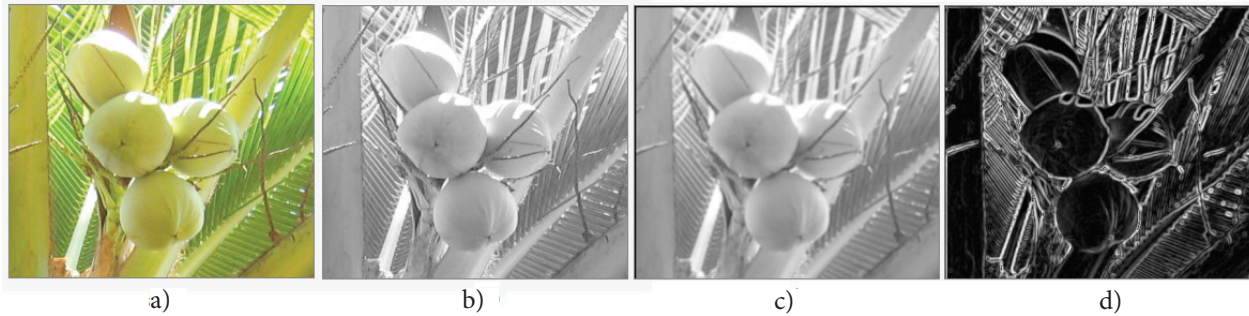


FIGURA 6. Primera etapa del procesamiento para la detección de cocos: a) Obtención de la imagen, b) Aplicación de escala de grises, c) Aplicación de filtro de Gauss, y d) Aplicación del filtro de Sobel.

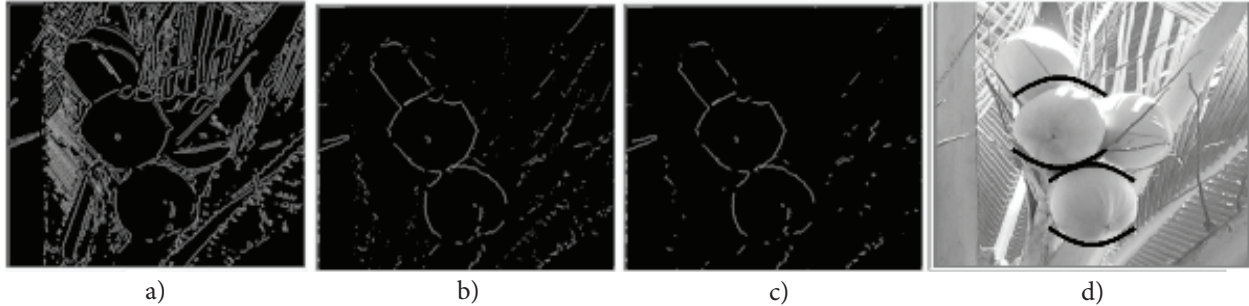


FIGURA 7. Segunda etapa del procesamiento para la detección de cocos: a) Aplicación de la segunda derivada, b) Aplicación del filtro para la eliminación de hojas, c) Aplicación del filtro para la eliminación de elementos no eliminados y d) Obtención de los cocos en la imagen procesada.

Se observó durante el procesamiento de las imágenes que el algoritmo propuesto para la eliminación de elementos externos a los cocos, funciona también para la detección de contornos de figuras con áreas que poseen una misma intensidad y color similar. Por ello, este método podría funcionar asimismo para la detección de elementos similares a la forma de los cocos.

El concepto de la transformada circular de Hough se ha usado en agricultura para la detección de frutas esféricas como manzanas, naranjas y cocos (Rizon *et al.*, 2005). No obstante, esta transformada es relativamente cara desde el punto de vista computacional, por lo que han sido propuestas varias técnicas para reducir su complejidad (Kapach *et al.*, 2012).

Si el robot ya posee un mecanismo para realizar el corte de los cocos, el usuario podría realizar este corte posicionando el cortador en el pedúnculo del racimo de éstos guiándose por las imágenes que la cámara transmita.

CONCLUSIONES

El mecanismo de biela-manivela, a pesar de ser muy rústico, resultó efectivo para el ascenso del robot sobre la palmera. Además ayuda a disminuir la presencia de motores sobre el robot, reduciendo considerablemente la cantidad de dispositivos electrónicos necesarios para su control. Se debe cambiar el motor usado para incrementar el torque y así no tener problemas en cuanto al peso soportado por el robot al momento de subir sobre la palmera.

El módulo de control a distancia es una buena opción para manipular al robot, ya que elimina la presencia de cables que pueden afectar su funcionamiento óptimo, además de que permite que a una distancia significativa se pueda realizar la manipulación del mismo.

La detección de los cocos con la aplicación del filtro desarrollado resulta ser una buena forma de eliminar los puntos no deseados, y al quedarse con los bordes de éstos se observa que la forma obtenida es equivalente a la de una circunferencia, lo que ayudó a realizar una detección más rápida basada en detección de elipses en imágenes digitales.

LITERATURA CITADA

- Granados Sánchez D.; López Ríos G. F. 2002. Manejo de la palma de coco (*Cocos nucifera* L.) en México. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 8(1): 39-48.
- Hahn F.; Martínez P.; Reyes A. A. 2012. Modelo teórico para predecir el lugar del corte y optimizar la extracción de la pulpa en coco. Ingeniería Agrícola y Biosistemas 4(1): 13-17.
- Jian J. A.; Tseng C. L.; Lu F. M.; Yang E. C.; Wu Z. S.; Chen C. P.; Lin S. H.; Lin K. C.; Liao C. S. 2008. A GSM-based remote wireless automatic monitoring system for field information: A case study for ecological monitoring of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Hendel). J. Computer Electronics Agriculture 62: 243-259.
- Kapach K.; Barnea E.; Mairon R.; Edan Y.; Ben-Shahar O. 2012. Computer vision for fruit harvesting robots – state of the art and challenges ahead. Int. J. Computational Vision and Robotics 3 (1): 4-34.
- Mankin R. W.; Hagstrum D. W.; Smith M. T.; Roda A. L.; Kairo M. T. 2011. Perspective and Promise: a Century of Insect Acoustic Detection and Monitoring. American Entomologist 57: 30-44.

- Megalingam R. K.; Venumadhav R.; Pavan A.; Mahadevan A.; Kattakayam C. T.; Menon H. 2013. Kinect Based Wireless Robotic Coconut Tree Climber. 3rd. International Conference on Advancements in Electronics and Power Engineering. pp 201–206. January 8–9, 2013 Kuala Lumpur, Malaysia
- Pinhas J.; Soroker V.; Hetzronic A.; Mizrachc A.; Teichera M.; Goldberger J. 2008. Automatic acoustic detection of the red palm weevil. *Computer Electronics Agriculture* 63: 131–139.
- Rizon M.; Yazid H.; Saad P.; Shakaff A.; Saad A. 2005. Object detection using circular Hough transform. *American Journal of Applied Sciences* 2(12): 1606–1609.
- Siriwardena K. A.; Fernando L. C.; Nanayakkara N.; Perera, K. F.; Kumara, A. D.; Nanayakkara, T. 2010. Portable acoustic device for detection of coconut palms infested by *Rynchophorus ferrugineus* (Coleoptera: Curculionidae) *Crop Protection* 29: 25–29.
- Tavakoli, M. 2010. Design, implementation, path planning, and control of a pole climbing robot. PhD Thesis, Department of electrical and computer Engineering, University of Coimbra, Portugal.
- Xie Y.; Ji Q. 2002. A new efficient ellipse detection method. *Proceedings of 16th International Conference on Pattern Recognition*. 2: 957–960, IEEE.

